

보도시점

2026.5.29.(금) 03:00  
(국제 엠바고)  
(2026.5.29.(금) 조간)

배포

2026.5.28.(목) 14:00

## 서울대-스탠포드 공동연구진, “수소 생산 효율은 크게 늘리고, 비용은 낮춘” 차세대 촉매기술 개발

- 과기정통부 Top-Tier사업 서울대 박정원 교수-스탠포드 하라미요 교수 연구팀, ‘원자수 정밀 제어 백금 클러스터 촉매 기술’ 개발로 Science紙 게재
  - 실험실 규모 수십 그램(g)까지 대량 생산 추가 스케일업 제한 크지 않아 산업화 가능성 커
- 【관련 국정과제】 26. 과학기술 5대강국 실현을 위한 시스템 혁신**

과학기술정보통신부(부총리 겸 과기정통부 장관 배경훈, 이하 ‘과기정통부’)는 「탑-티어 연구기관 간 협력플랫폼 구축 및 공동연구 지원(이하 ‘탑티어 사업)」 국제공동 연구진(韓서울대-美스탠포드)이 세계 최고 수준의 수소 생산 성능과 촉매 내구성(수명)을 동시에 구현할 수 있는 기술을 개발하였다고 밝혔다.

서울대학교 화학생물공학부 박정원 교수 연구팀은 미국 스탠포드대 화학공학부 토마스 F. 하라미요(Thomas F. Jaramillo), 마테오 카그넬로(Matteo Cargnello) 교수 연구팀과 수소 생산 촉매로 사용되는 고비용 귀금속인 백금의 사용량을 획기적(기존 상용 촉매 대비 10분의 1 수준)으로 줄이면서도 세계 최고 수준의 수소 생산 성능을 구현할 수 있는 차세대 촉매기술 개발에 성공했다.

과기정통부 탑티어 사업에 참여 중인 서울대학교-스탠포드 연구진은 이산 화탄소 포집·전환과 수소 저장·활용을 주제로 국제공동연구를 수행 중이다. 나노 수준의 소재 설계에서 세계 최고수준 역량을 가진 서울대 및 스탠포드 연구진은 협력을 통해 우수 연구성과뿐만 아니라 인력 및 정보 교류도 추진하고 있다. 이에 더해 공동연구 거점을 마련하는 등 양 기관 차원의 중장기적으로 지속가능한 협력 창구를 구축하고 있다.

세계적 수준의 공동연구팀 간 협력 시너지를 보여주는 이번 연구 성과는 세계 최고 권위의 국제학술지 「사이언스(Science)」誌에 5월 29일(금) 오전 3시(현지 시간 2026.5.28.(목) 18:00. GMT/UTC) 에 게재되었다.

※ 논문명 Dependence of catalytic properties of strongly supported platinum clusters with atom counts

수소는 탄소 중립 사회로의 전환을 이끄는 핵심 청정 에너지원으로 주목받고 있다. 그러나 대용량 수소를 장거리 운송할 때 기존의 고압가스, 액화수소 방식은 안정성과 비용 측면에서 한계가 있어, 액체 연료처럼 다룰 수 있는 액상유기수소운반체(LOHC) 기술이 유망한 대안으로 떠오르고 있다. 그러나, 이 기술은 운반된 액상 물질에서 다시 수소를 추출하는 과정 중에 값비싼 귀금속(백금) 촉매가 필수적이라는 문제가 있었다.

공동 연구팀은 백금 원자 주변의 화학물질\*(리간드)를 제거하고, 백금 원자를 지지체(촉매 기반물질)에 직접 결합시키는 새로운 촉매합성 전략을 도입하였다. 백금 원자가 지지체 위에서 가장 안정한 위치를 찾도록 유도하고, 수소 처리 과정을 거쳐, 머리카락 굵기의 10만분의 1크기(약 1nm)에 해당되는 백금 원자 뭉치(클러스터) 촉매를 균일하게 만드는 데 성공하였다. 이 촉매는 수소 추출 과정에서 백금 원자의 사용효율을 높이고, 지지체 위에 단단히 고정하여 뛰어난 내구성을 발휘한다.

\* 금속 원자가 화학적으로 안정된 상태로 유지될 수 있도록 주위를 둘러싸고 있는 화학물질

이에 더해, 연구팀은 새로 개발한 전자현미경 분석법을 통해, 겉보기에 거의 동일한 크기의 백금 원자 뭉치(클러스터)라도 구성 원자 수가 13개에서 31개 까지 다를 수 있음을 세계 최초로 밝혀냈다. 기존에는 비슷한 크기의 촉매 입자는 같은 성능을 가진다고 여겨졌으나, 이번 연구를 통해 ‘원자 개수’가 촉매의 수소생산 성능과 내구성을 결정하는 핵심 요인임을 입증하였다.

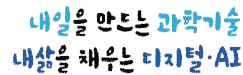
특히 이 과정에서, 서울대 연구진은 촉매 제조부터 구조 규명, 반응 성능 검증 등의 실험을 통해 핵심 연구결과를 확보하였고, 스탠포드 연구진은 나노소재 및 원자 수준 현상해석 전문성을 바탕으로, 백금 원자 개수와 수소 생산 효율의 관계(흡착특성)를 계산하는 역할을 맡았다. 양 기관은, 실험 결과와 계산 기반의 결과 해석을 상호보완적으로 연결하여 이번 성과를 창출해냈다.

이러한 기술로 개발된 촉매를 액체 상태 화합물에서 수소를 뽑아내는 반응에 적용한 결과, 시중 기존 촉매보다 백금 사용량이 10분의 1로 대폭 줄면서도, 수소 생산량과 촉매의 수명(내구성)은 오히려 크게 향상되었다. 또한 이 합성법은 실험실 규모에서 수십 그램 단위의 대량 합성이 단일 공정으로 가능하며, 향후 친환경 수소 사회를 앞당길 경제적·산업화 가능성까지 함께 확인하였다.

박정원 교수는 “이번 연구는 단순한 촉매 크기 최적화를 넘어, 원자 수 단위의 정밀한 구조 제어를 통해 수소 생산 성능을 극대화한 성과”라며, “기초연구와 산업적 응용을 직접 연결하는 촉매 플랫폼으로서 수소경제를 선도할 핵심 기술로 활용될 것으로 기대된다”고 밝혔다.

과학기술정보통신부 황성훈 국제협력관은 “박정원 교수 연구팀이 스탠포드대 연구팀과 함께 이뤄낸 이번 성과는 탐티어 사업이 지향하는 세계 최초·최고 수준의 연구성과 창출을 보여주는 대표적 사례”라며, “앞으로도 정부는 연구자들이 국제협력을 통해 연구 역량을 한층 강화하고, 세계를 선도하는 성과를 지속 창출할 수 있도록 든든한 지원군이 되겠다”고 밝혔다.

담당 부서	과학기술정보통신부 국제총괄협력담당관	책임자	과 장	이은주	(044-202-4330)
		담당자	사무관	조경태	(044-202-4332)
유관 기관	서울대학교 화학생명공학부		교신저자	주무관	박민희
		교 수		박정원	(02-880-2259)



## □ 연구를 시작한 계기나 배경은?

액상 유기 수소 운반체의 상용화를 위해서는 탈수소화 기반 수소 생산 반응에 적합한 고성능 촉매 개발이 필수적입니다. 기존 나노입자 촉매는 귀금속 사용량이 많아 비용 부담이 크고, 주요 활성 표면에 코크가 쉽게 쌓이면서 비활성화되는 한계가 있었습니다. 반면 단원자 촉매는 활성 구조가 지나치게 작아 해당 반응에서 충분한 활성을 구현하기 어려웠습니다. 이에 연구팀은 나노입자와 단원자의 중간 영역에 해당하는 클러스터 촉매에 주목했습니다. 균일한 클러스터를 형성하는 것은 매우 도전적인 과제였지만, 비정형 클러스터 구조를 활용하면 코크 축적에 따른 비활성화를 줄이면서도 효율적인 수소 생산이 가능할 것으로 판단했습니다.

특히 탑-티어 사업으로 국제협력을 추진해 온 나노광학 및 나노소재 분야 제니퍼 디온(Jennifer Dionne) 교수의 연구역량이 뛰어나 관련 연구에 대해 지속적으로 교류하며 논의를 이어오고 있었습니다. 본 연구를 추진하는 과정에서 원자 수 수준으로 제어된 비정형 백금 클러스터 촉매의 구조-성능 상관 관계를 보다 폭넓은 관점에서 해석하고, 연구 결과 논의를 심화하기 위해 스탠포드 연구팀과 협력하였습니다.

## □ 이번 연구가 국제공동연구로 이어진 배경과 각 연구팀의 역할은?

과기정통부가 지원하는 「탑-티어(Top-tier) 연구기관 간 협력 플랫폼 구축 및 공동연구」 사업은 세계 최고 수준의 연구기관과 대등한 협력 관계를 구축할 수 있는 환경을 마련해 주었고 본 연구가 국제공동연구로 본격화되는 중요한 계기가 되었습니다.

아울러 동 사업 참여를 통해 서울대와 스탠포드는 원천기술 개발 및 메커니즘 연구 분야, 수소 생산 및 활용 분야, 이산화탄소 포집 및 전환 분야 등에서의 우수 학술지 다수 게재 등 공동연구 성과를 창출해왔습니다. 또한 양 기관은 국제 공동워크숍을 개최(스탠포드, '25.2), 탑-티어 사업 참여 서울대 포닥의 스탠포드 파견 등을 통해 인력교류와 정보교류를 활성화하고 있습니다. 이와 함께 양 기관이 상호 연구자를 위해 마련한 연구공간을 기반으로 지속가능한 연구협력 거점 구축도 안정적으로 추진 중입니다.

특히 금번 연구에서 국내 연구팀은 백금 클러스터 촉매의 설계·합성, 구조 분석, 탈수소화 반응 성능 평가, 안정성 검증 및 대량 합성 가능성 검토를 주도하였습니다. 국내 연구팀은 촉매 제조부터 구조 규명, 반응 성능 검증까지 전 과정을 유기적으로 연계하는 실험적인 강점을 바탕으로 하여 핵심 연구 결과를 확보하였고, 스탠포드 대학 연구팀은 나노소재 및 원자 수준 현상 해석에 대한

전문성을 바탕으로 하여, 원자 수 의존 흡착 특성 계산과 학술적 논의에 참여하였습니다. 양 기관의 협력을 통해 합성 결과, 반응 성능, 구조 분석 데이터를 연계하여 실험 결과와 계산 기반 해석을 상호 보완적으로 연결할 수 있었으며, 이를 통해 원자 수가 조절되는 백금 클러스터 촉매의 작동 원리와 수소 생산 기술로의 확장 가능성을 함께 검토하였습니다.

## □ 연구 전개 과정에 대한 소개

가장 범용적인 함침법으로 클러스터 구조를 지지체 위에 제조할 경우, 나노입자가 함께 비선택적으로 형성되는 것을 배제하기 어려웠고 일부 단일 원자 구조도 혼재하였습니다. 한편, 용액상에서 균일한 클러스터를 형성하는 방법은 실험실 규모에서는 비교적 쉽게 구현할 수 있었지만, 이를 지지체에 균일하게 분포시키기는 어려웠습니다. 또한 클러스터 형성에 필요한 강한 리간드가 활성점을 막는 문제가 있었고, 열처리를 통해 리간드를 제거하면 클러스터 구조가 안정적으로 유지되지 못했습니다. 이에 연구팀은 새로운 전략으로, 리간드를 배제한 금속 전구체 원자들을 지지체에 직접 결합시키는 방식을 도입하였습니다.

## □ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는 무엇인지? 어떻게 극복(해결)하였는지?

촉매 합성은 오랜 역사를 가진 분야이지만, 이번 연구는 기존에 보고되지 않았던 새로운 균일 클러스터 합성 방법을 도입한 사례였습니다. 따라서 단순히 합성 결과를 제시하는 데 그치지 않고, 이론적인 부분을 포함한 근본적인 의문들을 함께 해결하는 접근이 필요했습니다. 또한 학문적 성취를 넘어 산업적 생산까지 가능하도록, 경제적이고 단순한 합성법을 구현하는 것도 중요한 과제였습니다.

기존 촉매 입자 크기 이론에서는 입자 크기가 같으면 동일한 촉매 입자로 간주하는 경향이 있었습니다. 그러나 본 연구는 유사한 크기의 클러스터라도 원자 수와 구조적 특성에 따라 촉매 성능이 달라질 수 있음을 입증해야 했기 때문에, 기존 해석과 차별화된 연구결과를 설득력 있게 제시하는 것이 주요 과제였습니다. 이에 연구팀은 새로운 전자현미경 분석법을 개발하고 다양한 방식의 교차 검증을 수행하였으며, 해당 분야에서 세계적 전문성을 보유한 스탠퍼드대 연구팀과의 국제협력을 통해 원자 수 의존 특성 확인과 결과 해석을 고도화하였습니다. 이를 통해 실험적으로 관찰된 클러스터 구조 차이와 촉매 성능 변화 간의 연관성을 보다 명확히 규명하고, 연구결과의 신뢰성과 설득력을 강화할 수 있었습니다.

## □ 이번 성과, 무엇이 다른가?

이번 연구를 통해 원자 수가 조절된 균일한 백금 클러스터를 지지체 위에 선택적으로 형성하고, 이들이 수소 생산 반응 중에도 안정적으로 구조를 유지할 수 있음을 확인하였습니다. 특히 해당 합성법은 대량 합성으로 확장될 가능성이 열려 있어, 학계의 기초 연구와 산업적 응용을 직접 연결할 수 있는 촉매 플랫폼이 될 수 있을 것으로 기대합니다. 또한 촉매 클러스터의 크기를 최적화하는 것에 그치지 않고, 원자 수 수준의 정밀한 조절을 통해 수소 생산 성능을 추가로 향상시킬 수 있음을 보였습니다.

## □ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

본 촉매 시스템은 액상 유기 수소 운반체에 기반한 수소 생산과 저장 반응에 모두 활용될 수 있습니다. 특히 개발한 촉매는 세계 최고 수준의 수소 생산 성능을 구현하면서도, 메탄올과 같은 비교적 저렴한 용매를 사용해 실험실 규모에서 단일 공정으로 수십 그램 수준의 대량 합성이 가능함을 보였습니다. 향후 실용화를 위해서는 경제성 분석을 통해 메탄올 사용량과 재사용 가능성을 검증할 필요가 있습니다. 또한 지지체 최적화가 추가적으로 이루어진다면, 더 낮은 비용으로 단위 촉매량당 더 높은 성능을 구현하는 촉매 개발도 가능할 것으로 기대됩니다.

## □ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

많은 과학 연구는 과학자와 연구자들에게 흥미로운 발견을 제공하며 과학의 발전을 이끌어 왔습니다. 그러나 최근에는 과학계의 연구 성과와 산업계의 실제 수요 사이의 괴리가 점점 커지고 있습니다. 본 연구는 과학적으로 의미 있는 발견을 제시하는 동시에, 상업화 가능성과도 밀접하게 연결된 연구라고 생각합니다. 앞으로 이 촉매 시스템이 지속 가능한 수소 에너지 활용을 위한 실제 산업 현장에서 적용될 수 있도록 후속 연구를 이어가고자 합니다.

특히 서울대와 스탠포드는 탐-티어 사업을 통해 구축한 협력 플랫폼을 양 기관 간 일회성 협력에 그치지 않고 지속가능한 협력모델로 발전시키기 위해, 양 기관이 공동으로 운영할 수 있는 독립적 연구협력 조직 구체화를 추진 중입니다. 이를 기반으로 한미 기후변화 대응 분야 공동연구 등을 선도하는 협력 플랫폼을 구축하고, 양 기관 간 협력을 한미 연구자 간 공동연구와 인력교류로 확장해 나가고자 합니다.

## &lt;박정원, 교신저자&gt;



## 1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 화학생물공학부
- 전 화 : 02-880-2259

## 2. 학력

- 2000 ~ 2003 포항공과대학교 화학과
- 2006 ~ 2012 UC버클리대학교 화학과 박사
- 2012 ~ 2016 하버드대학교 화학과 박사후연구원

## 3. 경력사항

- 2025 ~ 현재 서울대학교 화학생물공학부 교수
- 2020 ~ 2025 서울대학교 화학생물공학부 부교수
- 2016 ~ 2020 서울대학교 화학생물공학부 조교수
- 2025 신양공학 학술상
- 2021 Y-KAST 선발
- 2020 한성과학상 수상
- 2020 젊은과학자상 수상

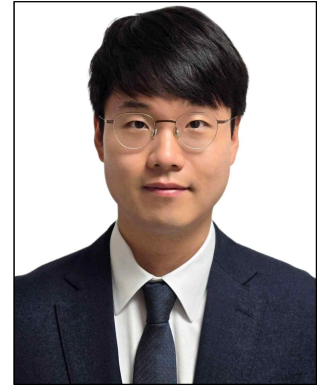
## 4. 전문분야 정보

- 원자·나노스케일에서 재료가 합성·반응·변화하는 과정을 실시간 전자현미경으로 관찰하고, 이를 촉매·에너지·기능성 소재 설계로 연결

## 5. 연구지원 정보

- 2024 ~ 현재 과학기술정보통신부, 한국연구재단 탑-티어(Top-tier) 연구기관 간 협력 플랫폼 구축 및 공동연구 지원사업
- 2024 ~ 현재 과학기술정보통신부, 한국연구재단 국가수소중점연구실(H2NEXTROUND)

## <송찬경, 제1저자>



### 1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 화학생물공학부
- 전 화 : 02-880-1582

### 2. 학력

- 2010 ~ 2014 서울대학교 학사 (화학생물공학부)
- 2014 ~ 2020 서울대학교 석·박사통합 과정 (화학생물공학부)

### 3. 경력사항

- 2020 ~ 현재 서울대학교 화학공정신기술연구소 연수연구원

### 4. 전문분야 정보

- 원자 수 수준에서 정밀 제어된 촉매 구조의 합성 및 분석, 그리고 도전적 화학반응으로의 응용

## <정준혁, 제1저자>



### 1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 화학생물공학부
- 전 화 : 02-880-1582

### 2. 학력

- 2014 ~ 2018 서울대학교 학사 (화학생물공학부)
- 2018 ~ 2026 서울대학교 석·박사통합 과정 (화학생물공학부)

### 3. 경력사항

- 2026 ~ 현재 삼성전자

### 4. 전문분야 정보

- 나노구조 합성 및 분석, 성능 평가

## <토마스 F. 하라미요(Thomas F. Jaramillo), 공동저자>

### 1. 인적사항

- 소속 : 스탠포드대학교 화학공학과

### 2. 학력

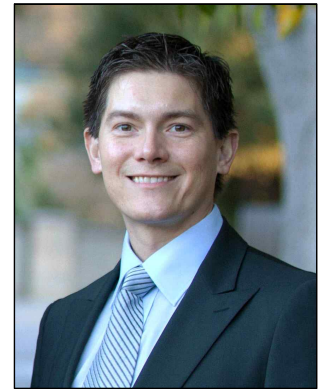
- 2000 UC산타바바라대학교 화학공학 석사
- 2004 UC산타바바라대학교 박사
- 2004 ~ 2005 UC산타바바라대학교 화학공학 박사후연구원

### 3. 경력사항

- 2023 ~ 현재 스탠포드대학교 화학공학과 · 에너지과학공학과 교수
- 2023 ~ 현재 SLAC 국립가속기연구소 광자과학부 교수
- 2018 Clarivate Analytics Highly Cited Researcher(피인용 상위1% 연구자)
- 2021 Paul H. Emmett Award in Fundamental Catalysis
- 2011 Presidential Early Career Award for Scientists and Engineers

### 4. 전문분야 정보

- 에너지 전환 촉매, 전기화학 촉매 및 계면과학 분야에서 수소 생산, 이산화탄소 전환, 암모니아 생산, 연료전지 및 태양연료 관련 촉매 소재 · 반응 공학 연구 수행



## <마테오 카그넬로(Matteo Cargnello), 공동저자>

### 1. 인적사항

- 소속 : 스탠포드대학교 화학공학과

### 2. 학력

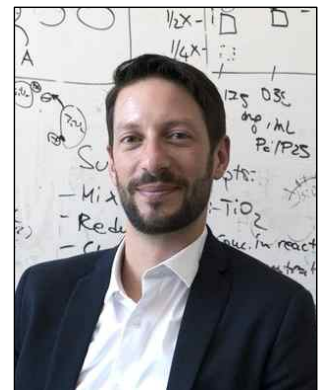
- 2008 트리에스테대학교 화학 석사
- 2011 트리에스테대학교 나노기술 박사
- 2012 ~ 2014 펜실베이니아대학교 화학과 박사후연구원

### 3. 경력사항

- 2023 ~ 현재 스탠포드대학교 화학공학과 · 재료공학과 부교수
- 2015 ~ 2022 스탠포드대학교 화학공학과 조교수
- 2022 ACS Catalysis Division Early Career Award in Catalysis
- 2018 Sloan Research Fellowship

### 4. 전문분야 정보

- 촉매 응용을 위한 나노소재 설계 · 합성, 반응 조건에서의 촉매 구조 분석, 기능성 나노입자 기반 불균일 촉매 및 금속-지지체 상호작용 연구 수행



논문명	Dependence of catalytic properties of strongly supported platinum clusters with atom counts
저널명	Science
저자	박정원 교수(교신저자/서울대학교), 송찬경(제1저자/서울대학교), 정준혁(제1저자/서울대학교)

※ 설명 및 그림 제공 : 서울대학교 박정원 교수

## 1. 연구배경

- 수소는 탄소 중립 사회로의 전환을 가능하게 해주는 중요한 청정 에너지원으로 주목받고 있으나, 수소가 확보되는 장소에서 바로 사용하는 경우는 제한적이다. 재생에너지 기반 수소 생산지는 대규모 수요처와 떨어져 있는 경우가 많으며, 산업·모빌리티·발전 분야에서 수소를 효과적으로 활용하기 위해서는 대용량 수소를 안정적으로 저장하고 장거리 운송하는 기술이 필수적이나, 아직 해결되지 못한 난제로 남아 있다. 고압 수소 가스나 액화수소 방식은 저장 및 운송 과정에서 높은 비용 및 안정성 부담이 따르며, 이에 기존의 액체 연료와 유사하게 수소를 저장, 운송하여 활용할 수 있는 액상 유기 수소 운반체 기술이 유망한 대안으로 주목받고 있다.
- 액상 유기 수소 운반체 기술이 상용화되어 실제 수소 공급망에서 폭넓게 활용되기 위해서는, 운송된 물질에서 필요한 장소와 시점에 수소를 빠르고 안정적으로 생산할 수 있어야 한다. 액상 유기 수소 운반체를 활용하는 전 과정에서 가장 에너지 소모가 높은 부분이 탈수소화를 통한 수소 생산 반응 부분이며, 귀금속 촉매를 필수적으로 사용하여야 해서 촉매의 비용도 매우 비싸다. 그러나 기존 촉매는 장시간 반응 중 성능이 저하되며, 충분한 수소 생산량을 확보하기 위해 많은 양의 귀금속이 필요하여 경제성 확보에 한계가 있다.
- 백금과 같은 귀금속 촉매는 수소 생산 반응에서 높은 활성을 보이지만, 높은 가격으로 인해 대규모 수소 생산 공정에 적용하기 위해서는 금속 사용량을 최소화하는 것이 필요하다. 기존 나노입자

촉매는 구조적으로 비교적 안정하지만, 입자 내부의 금속 원자들이 반응에 직접 참여하지 못해 귀금속 사용 효율이 낮다는 한계가 있다. 반면 단일 원자 촉매는 금속 원자를 모두 활성 구조로 활용할 수 있으나, 반응 중 이동과 응집으로 인한 안정성 문제가 있다. 또한 액상 유기 수소 운반체와 같이 큰 유기 분자가 관여하는 탈수소화 반응에 활용하기에는 활성 구조가 지나치게 작다.

- 따라서 대용량 수소 운송 및 생산 기술의 실용화를 위해서는 적은 양의 귀금속으로도 높은 수소 생산량과 안정성을 동시에 확보할 수 있는 새로운 촉매 개념의 도입이 필요하다. 수십 개의 금속 원자로 이루어진 클러스터 촉매는 나노입자 촉매와 단일 원자 촉매의 장점을 동시에 가질 수 있는 후보로 주목받고 있다. 하지만, 균일한 클러스터 구조만 선택적으로 형성하는 방법이 알려지지 않아 현재까지는 촉매로의 활용에 한계가 있었다. 또한 클러스터 촉매의 성능은 단순한 입자 크기뿐 아니라 원자 수와 지지체의 상호작용에 따라 크게 달라지므로, 원자 수준에서 구조를 이해하고 이를 수소 생산 성능과 연결하는 연구 역시 필요하다.

## 2. 연구내용

- 연구팀은 백금 사용량을 줄이면서도 수소 생산 성능을 높일 수 있는 새로운 촉매 설계 전략을 도입하였다. 구체적으로, 리간드가 제거된 백금 원자를 용액상에서 지지체에 직접 결합시키는 방법을 도입하였다. 이렇게 형성된 백금 원자들은 지지체 위에서 자유롭게 이동하면서, 공기 소성 과정에서 가장 강하게 결합할 수 있는 자리에 선택적으로 자리 잡았다. 이후 수소 환원을 통해 약 1나노미터 크기의 균일한 비정형 클러스터를 형성할 수 있었다.
- 연구팀은 백금 함량을 최대 5배까지 높여도 균일한 클러스터가 1나노미터 수준의 거의 동일한 크기로 형성될 수 있음을 확인하였다. 기존에는 유사한 크기의 클러스터가 동일한 원자 수와 특성을 가질 것으로 예상되었으나, 연구팀은 전자현미경 분석법을 개발해

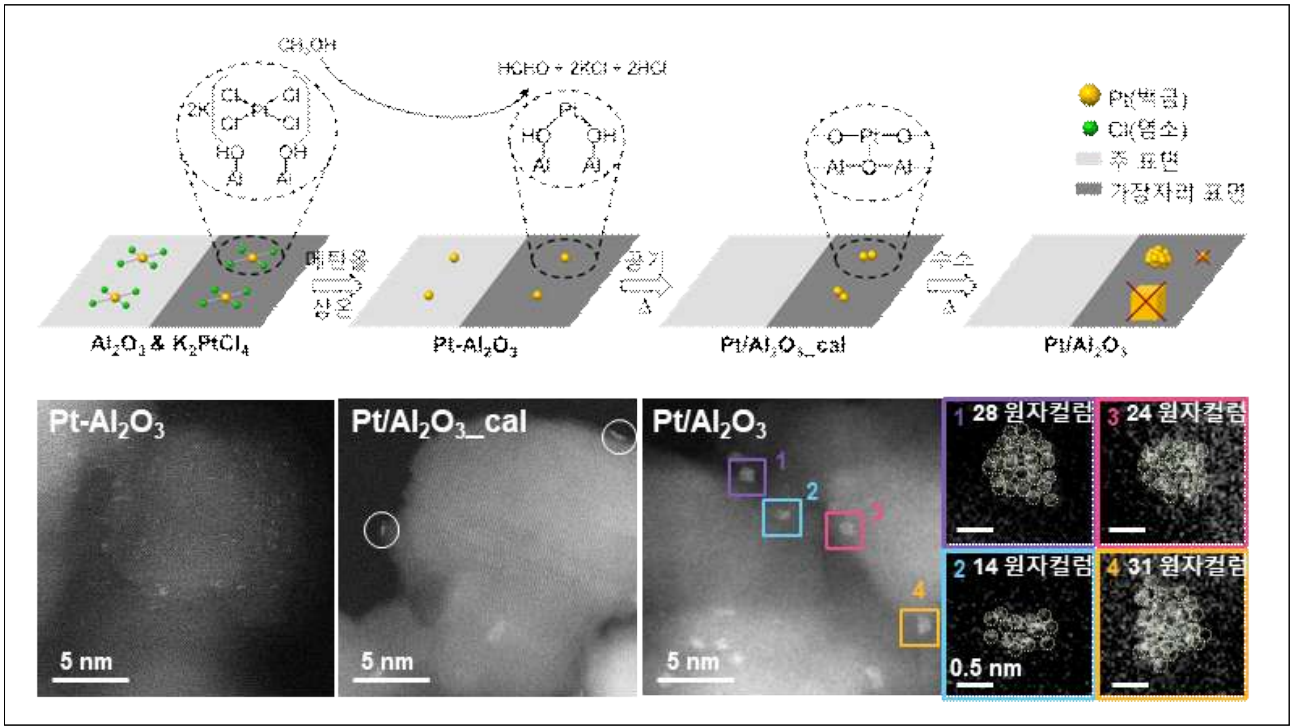
적용함으로써 13~31개에 이르는 넓은 범위의 원자 수로 클러스터를 정밀하게 조절할 수 있음을 규명하였다. 이를 통해 클러스터 촉매의 성능은 단순한 크기뿐만 아니라, 클러스터를 구성하는 원자 수에 의해 달라질 수 있음을 밝혔다.

- 개발된 백금 클러스터 촉매는 대표 액상 유기 수소 운반체 물질인 메틸사이클로헥세인의 탈수소화를 통한 수소 생산 반응에서, 상용 촉매보다 10배 적은 백금 사용량으로도 더 높은 수소 생산 활성과 내구성을 동시에 구현할 수 있음을 확인하였다. 클러스터 촉매를 활용 시 최대 백금 1g 당 분당 50,285mmol의 수소 생산 성능을 보였는데, 이는 백금 원자 1개가 초당 약 160개의 수소 분자를 생산하는 수준으로, 기존 보고된 촉매들과 비교 시에도 세계 최고의 백금 원자 대비 수소 생산량에 해당한다. 또한 거의 동일한 크기의 클러스터 촉매에서도 원자 수가 적을수록 백금 원자 당 활성은 높지만, 내구성은 낮아지는 경향을 검증하였다. 이를 통해 연구팀은 수소 생산 활성과 내구성을 동시에 고려한 최적의 백금 클러스터 설계 방향을 제시할 수 있었다.

### 3. 기대효과

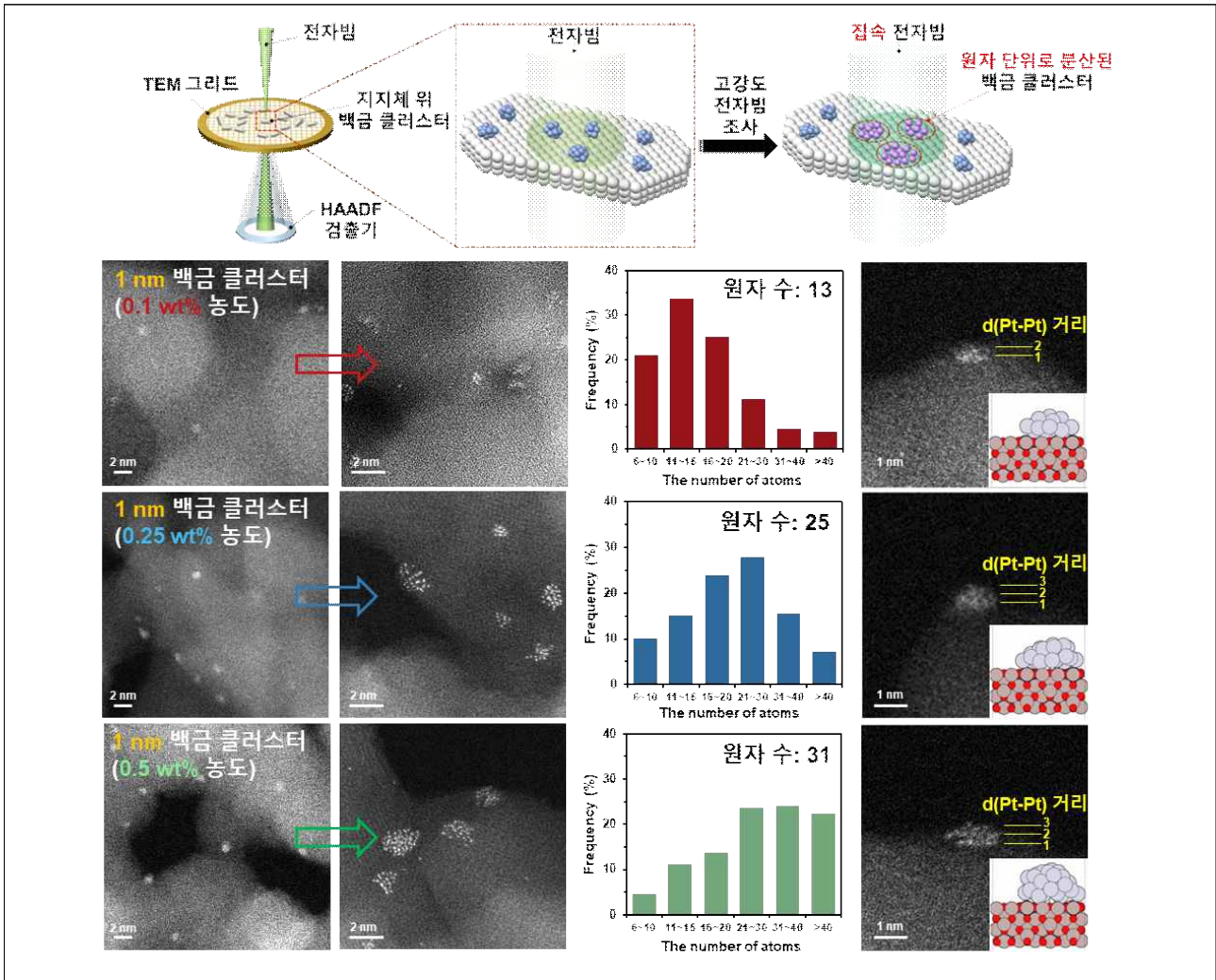
- 개발한 원자 수 조절 균일 클러스터 촉매 합성법은 실험실 규모에서 최대 수십 그램 수준까지 단일 공정으로 구현되었으며, 원리상 추가적인 스케일업에도 제한이 크지 않음을 확인하였다. 기존에는 균일 클러스터 촉매의 1그램 수준 합성도 매우 도전적이었다는 점을 고려하면, 이는 본 촉매 시스템이 경제적인 산업화와 대량생산이 가능한 수소 생산 촉매 플랫폼임을 보여준다.
- 리간드를 제거한 금속 원자를 활용해 안정적인 클러스터를 형성하는 이번 합성 전략은 일반화할 수 있는 개념이다. 따라서 본 연구에서 주로 다룬 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계뿐만 아니라 다양한 금속 원소와 지지체로 확장될 수 있으며, 폭넓은 촉매 난제 반응에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

<(그림1) 균일한 클러스터의 선택적 형성 모식도와 형성 과정별 전자현미경 관찰 결과>



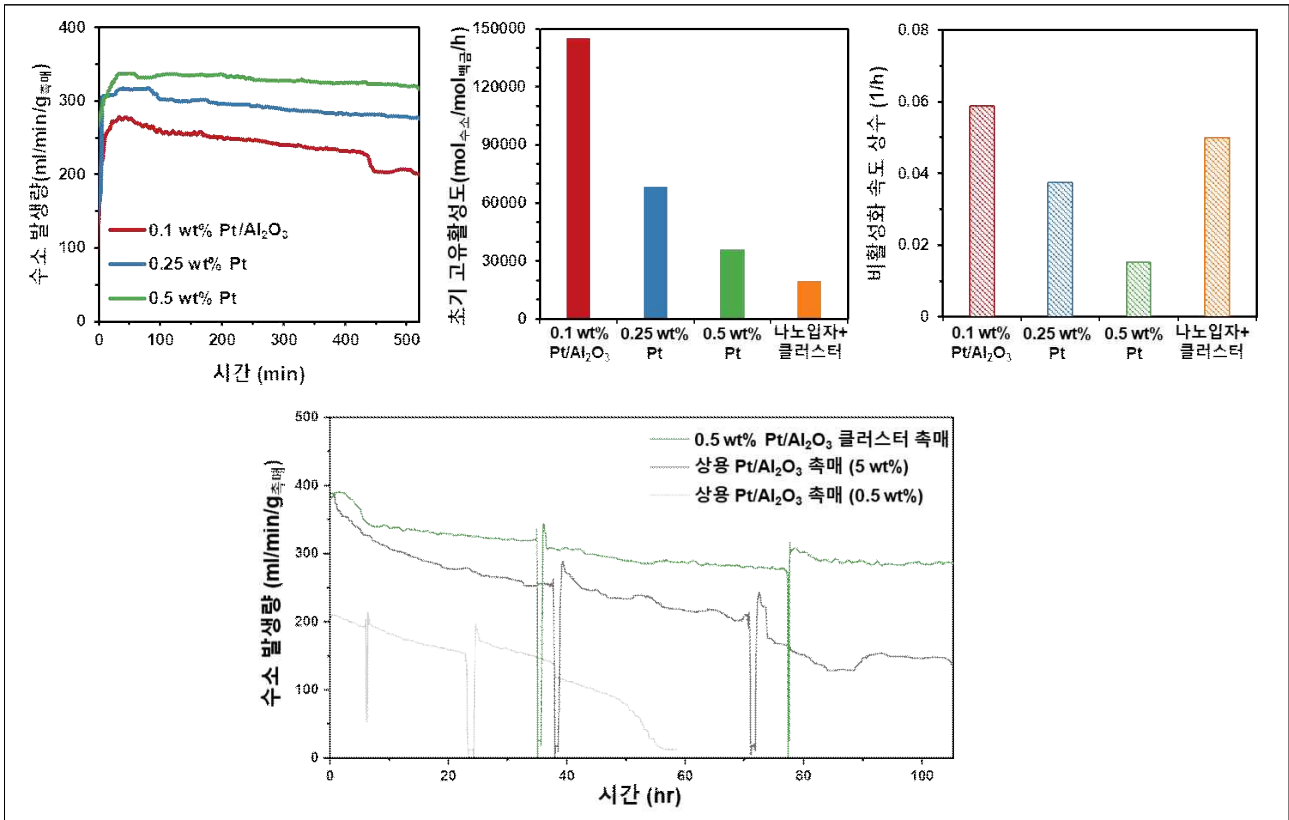
- 메탄올을 활용한 온화한 환원법으로 리간드를 제거하고 백금 원자와 지지체의 직접 결합을 유도하였다. 이후 공기 소성 및 수소 환원 과정을 통해 지지체와 강하게 결합한 균일한 클러스터를 형성하였다.
- 원자분해능 전자현미경을 통해 각 형성 과정을 추적하였으며, 최종적으로 형성된 균일 클러스터는 거의 동일한 크기에서도 서로 다른 원자컬럼 수를 보이는 것으로 확인되었다.

<(그림2) 유사 크기 클러스터의 원자 수 수준 분석법과 클러스터 촉매 분석>



- 전자현미경을 활용해 클러스터를 원자 수 수준으로 분석하는 방법을 개발하였다.
- 1 나노미터 수준에서 거의 동일한 크기의 백금 클러스터라도 금속 농도에 따라 13~31개의 원자 수를 갖도록 합성할 수 있음을 규명하였다.

<(그림3) 액상 유기 수소 운반체 탈수소화 기반 수소 생산 성능 비교>



- 액상 유기 수소 운반체 중 가장 보편적으로 활용되고 상용화가 진행 중인 메틸사이클로헥세인을 이용해 수소 생산 성능을 평가하였다.
- 0.1, 0.25, 0.5 wt% Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 클러스터 촉매를 비교한 결과, 더 적은 원자 수로 구성된 클러스터일수록 백금 원자 당 성능은 높았지만, 안정성은 낮아지는 경향을 보였다.
- 개발한 0.5 wt% Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 클러스터 촉매는 상용 촉매의 1/10 수준에 불과한 백금 사용량으로도 더 높은 활성과 안정성을 구현하였다.